



Snötäckets betydelse för vinterns första tjäle i Svartberget

The impact of snow cover on initiation of ground frost at Svartberget



Foto: Jan Lindblad

Rasmus Behrenfeldt & Jan Lindblad



Kandidatarbeten i Skogsvetenskap

Fakulteten för skogsvetenskap,
Sveriges lantbruksuniversitet

Enhet/Unit	Institutionen för skogens ekologi och skötsel Department of Forest Ecology and Management
Författare/Authors	Rasmus Behrenfeldt & Jan Lindblad
Titel	Snötäckets betydelse för vinterns första tjäle i Svartberget
Title	<i>The Impact of snow cover on ground frost start at Svartberget</i>
Nyckelord/ Keywords	Snötäcke, tjäle, marktemperatur, klimatförändringar, skogsbruk/ <i>Snow cover, ground frost, soil temperature, climate change, forestry</i>
Handledare/Supervisors	Tord Magnusson, SLU, Inst. för skogens ekologi och skötsel Mikael Ottosson Löfvenius, SLU, Inst. för skogens ekologi och skötsel
Examinator/Examiner	Tommy Mörling, SLU, Inst. för skogens ekologi och skötsel/ <i>Department of Forest Ecology and Management</i>
Kurstitel/Course	Kandidatarbete i skogsvetenskap <i>Bachelor Degree in Forest Science</i>
Kurskod	EX0592
Program	Jägmästarprogrammet
Omfattning på arbetet	15 hp
Nivå och fördjupning på arbetet	G2E
Utgivningsort	Umeå
Utgivningsår	2016

FÖRORD

Vi vill tacka följande personer som möjliggjort studien:

Vår handledare Tord Magnusson, universitetslektor och forskare vid *SLU, Inst. för Skoglig ekologi och skötsel*, för hans stora engagemang och stöd.

Mikaell Ottosson Löfvenius, universitetslektor och forskare vid *SLU, Inst. för Skoglig ekologi och skötsel*, som bidragit med värdefulla ämneskunskaper och råd.

Hjalmar Laudon, professor vid *SLU, Inst. för Skoglig ekologi och skötsel*, för inspiration till studien och administrativ hjälp med data från Svartbergets försökspark.

Våra vänner vid jägmästarprogrammet som fungerat som bollplank och bidragit med glada hejarop och inspirerande fikapauser.

SAMMANFATTNING

Marktjäle bildas när vatten i marken fryser och är vanligt förekommande i stora delar av norra Sverige. Marktemperatur och tjälförekomst påverkar många viktiga processer i och ovan mark, e.g. rotdödlighet, mikroorganismers aktivitet, utlakning, vattenkemi och gasflöden. Den markförstärkande tjälen har även på flera sätt betydelse för skogsbruket, e.g. omfattningen av mark- och vindskador. Många faktorer styr hur lätt en jord tjälas. I den här studien läggs vikten på den isolerande snö som vintertid ofta täcker marken i boreala skogar. Syftet var att visa hur snötäckets ankomsttid, varaktighet och djup påverkar vinterns starttidpunkt för tjäle vid Svartberget, Västerbotten. Våra hypoteser var att tjälstart bestäms av lufttemperatur, marktemperatur och snöförekomst och att det sistnämnda har en stor betydelse. Snödjups-, lufttemperatur-, marktemperatur-, och tjäldjupsdata från Svartbergets försökspark för två separata årsserier (1983-1998 respektive 1994-2016) analyserades. Våra resultat indikerade flera samband mellan snöförekomst och tidpunkt för tjälstart. Det krävs även fler och/eller kallare frostdygn för att tjäle ska uppkomma under vintrar med många snö dagar och stort snödjup. Inget tydligt mönster över hur tjälstartsdatum har förändrats över tiden kunde observeras. Klimatförändringar kommer på olika sätt förändra förekomsten av säsongsmässig tjäle i framtiden. Ökade temperaturer vintertid och förändringar i nederbördsmonster kan ge lokalt varierande förändringar i tjälförekomst. Effekter av dessa förändringar påverkar såväl skogsbruket som viktiga markkemiska processer och den globala kolbalansen.

Nyckelord: Snötäcke, tjäle, marktemperatur, klimatförändringar, skogsbruk

SUMMARY

Ground frost forms when soil water freezes and is common in most parts of northern Sweden during the winter. Ground frost and temperature affects several major soil processes, e.g. root mortality, leaching, water chemistry, gas flows and activity of microorganisms. The strengthening ground frost also protects the soil from excessive mechanical disturbance during logging and affects forest management. Ground frost is determined by many factors. In this study we focus on the importance of an insulating snow pack that often covers the ground in boreal forests during the winter season. The aim was to show how the arrival, duration and depth of the snow pack affects the initiation of ground frost at Svartberget, Västerbotten. Our hypotheses were that the initiation of ground frost is determined by air temperature, ground temperature and, most importantly, by the presence/absence of a continuous snow pack. Air and ground temperature, snow depth, and ground frost depth data from Svartberget research station were analyzed for two separate time series (1983-1998 and 1994-2016 respectively). Our results suggests multiple correlations between snow pack depth and duration in early winter, and the initiation of ground frost. The deeper the early snow pack, the more cold days below 0°C are needed to form the first ground. No clear time trend regarding change in ground frost start date could be observed. Climate change will, through different ways, alter seasonal ground frost in the future. Increasing temperatures and new precipitation patterns could give locally varying changes in ground frost occurrence. The effects of these changes affects forest management as well as soil processes and the global carbon balance.

Keywords: Snow cover, ground frost, soil temperature, climate change, forestry.

INLEDNING

Marktjäle bildas när vatten i marken fryser och är vanligt förekommande i stora delar av norra Sverige. Trots att säsongsmässig tjälbildning förekommer i stora delar av världen har studier inom området fått relativt lite uppmärksamhet historiskt jämfört med studier på ihållande tjäle, i.e. permafrost. (Zhang *et al.* 2005). Marktemperatur påverkar vintertid flera viktiga processer både i och ovan mark i boreala skogar (Haei M. *et al.* 2011; Drotz S. *et al.*). En förändring i årlig tjälförekomst kan påverka dödligheten hos rötter och mikroorganismer, näringscykler, utlakning, vattenkemi och gasflöden mellan mark och atmosfär i nordligt belägna skogar (Groffman *et al.* 2001). Tjälförekomst är även viktigt för skogsbruket vid drivning av virke då man, genom att avverka vintertid, vill undvika körsador i marken. Om förekomsten av den markförstärkande tjälen förändras i framtiden kommer skogsbruket behöva drivningsplanera efter detta (Eriksson 2007; Sonesson 2007).

Förekomsten av tjäle varierar från år till år och är starkt korrelerad med marktemperatur som förutom lufttemperatur även regleras av faktorer som jordens vattenmättnadsgrad, bulkdensitet och textur (Hillel 1980). Hillel (1980) beskriver marksystemet i tre faser. Jordens sammansättning utgör dess fasta fas och förändras, i ett kortare perspektiv, inte med tiden. Ju grövre textur en jord har desto mer tjälbenägen är den. Texturen påverkar även tjälens struktur, som kan vara mer eller mindre massiv. Luft- och vattenfaserna varierar med tiden och är starkt påverkande faktorer till marktjälning. I boreal skog har snötäckets varaktighet och djup, i och med dess isolerande egenskaper, en viktig påverkan på marktemperaturen (Venäläinen A. *et al.* 2001). Genom studier där snön avlägsnats kontinuerligt efter snöfall kunde man visa att de snötäckta ytorna hade mindre värmeförluster än de utan snötäcke. För en vinter med avsaknad av ett betydande snötäcke förväntas således marktjälning bli mer utbrett (Zhao *et al.* 2016). En snöfri yta är samtidigt mer känslig för fluktuationer i lufttemperatur. Vid avsaknad av ett isolerande snötäcke mångdubblas temperaturvariationen i marken (Decker *et al.* 2003). Trots snöns betydelse för flera viktiga ekosystemtjänster är den en av de minst uppmätta klimatvariablerna i områden med säsongsmässigt snötäcke (Laudon *et al.* 2016).

Snö har en god isolerande förmåga som minskar värmeförlusterna från marken. Detta dämpar nedkylningen av marken. De fysikaliska processerna som minskar värmeflödet mellan atmosfär och mark är; albedo, emissivitet, absorption, termisk konduktivitet och latent smältvärme. Albedot har en stor betydelse för värmebalansen och är ett mått på reflexionsförmågan från en kropp. Snöns höga albedo varierar mellan ca 0,6 för gammal smältande snö på våren till mer än 0,85 för nysnö på hösten. Snöytans höga albedo gör att den reflekterar bort en stor del av den inkommande solstrålningen vilket håller dess temperatur nere. Detta medför även en minimal absorption av solenergi vilket ger samma effekt. Snön har också en mycket hög emissivitet vilket medför en hög utgående långvågsstrålning som även det håller snön kall. Torr snö består till stor del av luft och iskristaller den stillastående luften har en mycket dålig värmeledningsförmåga. Större delen av snön är fylld med luft, därav dess låga värmeledningsförmåga (termisk konduktivitet) och utgör en betydande isolator mellan marken och atmosfären. Eftersom luften är en nyckel till

den goda isolationsförmågan har en äldre kompakt snö sämre isolationsförmåga än torr nysnö. Energin som behövs för att smälta snö är mycket stor på grund av fasövergången mellan fast till flytande form. Energin kommer gå åt till att smälta snön och denna kommer att behålla en temperatur på 0°C tills det att snön är helt smält vilket medför att snön kommer att hålla marktemperaturen 0°C även fast luften är mycket varmare. Detta är möjligt på grund av snöns latent smältvärme. (Zhang *et al.* 2005).

Klimatmodeller visar att nederbörden, på nordsvenska breddgrader, kan komma att öka vintertid i och med ett varmare klimat. Detta medför indirekt högre marktemperaturer vintertid (Zhao *et al.* 2016). Samtidigt visar Wern (2015) att antal snö dagar i södra Norrland har minskat med mellan 10-30 dagar under 30 års-perioden 1960/61 - 1989/90. I andra delar av världen förväntas global uppvärmning leda till minskad mängd nederbörd vintertid med ett mindre utbredd snötäcke som följd. Detta kan få motsatta effekter på marktemperaturer (Groffman *et al.* 2001). Hur snöförekomsten i framtiden kommer påverkas av klimatförändringar förväntas variera lokalt. Man kan således inte förutse en generell ökning eller minskning (Moore & McKendry 1996). I Mellander *et al.* (2007) användes regionala klimatscenarier från det svenska klimatmodelleringsprogrammet SWECLIM och en SVAT-modell (Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer) för att förutspå klimatförändringars effekt på snöförekomst och marktemperatur. Resultaten föreslog ett framtida kortvarigare snötäcke och en högre medelmarktemperatur vid 10cm djup.

Syftet med den här studien var att visa på vilket sätt snötäckets ankomsttid, varaktighet och djup påverkar vinterns starttidpunkt för tjäle vid Svartberget, Västerbotten. Genom att analysera parametrarna lufttemperatur, marktemperatur och snödjup för två sammanhängande årsserier länkades tidpunkten för vinterns första tjäle med dess snöförekomst. Våra hypoteser var att (1) Lufttemperatur och snöförekomst styr marktemperatur och tjälförekomst på mätplatsen och att (2) Snöns djup och varaktighet har en stor påverkan för när vinterns första tjäle uppkommer.

MATERIAL OCH METOD

Svartbergets försökspark

Data som använts i denna rapport är tagna från Svartbergets fältstation och försökspark. Svartberget är beläget i Vindeln, ca 50km väster inåt landet från Norrlandskusten (64°, 14' N, 19° 46' E).

Snödjupsmätningar

Snömätningarna vid Svartbergets fältstation utgår från den meteorologiska organisationen WMO's rekommendationer. Mätningar har skett på samma ytor sedan starten - vintern 1980/81. Snöankomsten och snödjup observeras manuellt. Starttiden för snömätningarna börjar när minst 50 % av en 30 x 30m yta är snötäckt och stannar permanent för vintern. När smältningen har gått så lång att 50 % av ytan är snötäckt avslutas mätningarna. Snödjupet som mäts är ett medelvärde av 5 stycken snöstickor som är utsatta i en halvcirkel med en radie på 5m. Det är mätt ungefär veckovis men med fler mätningar i början och i slutet av säsongen. Medelvärdet av maxdjupen sedan vintern 1980/81 uppgår till 76cm (*Laudon et al. 2016*).

Lufttemperaturmätningar

Klimatdata har sedan 1980 uppmätts vid Svartberget fältstation. Flera meteorologiska standardvariabler mäts, även de enligt WMO's rekommendationer. För 30års-perioden 1981-2010 var medeltemperaturen årsvis 1,8°C och för januari månad -9,5°C. (*Laudon et al. 2013*). I den här studien har lufttemperaturdata, i form av dygnsmedeltemperaturer, för åren 1983-2016 används.

Tjäldjupsmätningar 1983-1998

Årsrapporter "*Klimat och vattenkemi vid Svartberget*" från *Vindeln Experimental Forest Station* mellan 1983-1998 tolkades som ett hjälpmedel för att utreda snötäckets isolerande förmåga och inverkan på tidpunkten för vinterns första tjäle. Främst användes tjäldjupsmätningar för att bestämma detta. Metoden för dessa mätningar beskrivs i *Odin* (1992). Marktemperaturmätningar för samma år och plats användes också, men enbart som stöd. I rapporterna var snödjup och tjälning dokumenterat från tre mätpunkter vid Svartberget. 1. *Hygge på moränsluttning, 225 m.ö.h.* 2. *Gammal granskog på moränsluttning, 233 m.ö.h.* 3. *Hygge, finmo på plan mark 178 m.ö.h.* Datat för tjälstart, lufttemperatur och snödjup som användes här var alla från *Hygge på moränsluttning, 225 m.ö.h.* (*Degemark*).

(red) 1984 – 2000)¹. För samtliga analyser i studien användes mätdata enbart från den här mätplatsen.

För att väga in både snötäckets varaktighet och djup beräknades varje vinter “Snöperiodscentimeter” (härefter kallat “SPCM”) från 1:a oktober fram till första dagen för tjäle. SPCM definieras här som produkten av antal dagar och medelsnödjupet mätt i centimeter för den givna perioden. Då tjäldatum inföll mellan två mätpunkter inkluderades den första snödjupsmätningen efter tjälstart. Ett medeltjäldatum för åren 1985-1998 togs fram genom att räkna ut ett medel av dagar från 1:a oktober fram till tjälstart.

Mätpunkterna för snödjupets utveckling över tiden sambands linjärt i en graf och SPCM togs fram genom att beräkna arean under grafen mellan samtliga mätpunkter (*se beräkning 1*). För samtliga årsperioder beräknades även frostdygnstemperatursumman (härefter kallat “FSUM”), dvs. summan av negativa dygnsmedeltemperaturer från och med 1:a oktober. SPCM-areorna summerades årsvis då SPCM och FSUM plottades mot varandra. SPCM plottades även för varje år mot tjälstart.

Beräkning 1. Snöperiodscentimeter - Snödjup och varaktighet kombinerat

Calculation 1. Snow period centimeter - Snow depth and duration combined.

$$\text{Snöperiodscentimeter} = \left(\frac{X_1 + X_2}{2} \right) * (Y_2 - Y_1)$$

X= Snödjup på de två mätpunkterna vars area beräknades benämns X1 och X2 (första och andra snödjup)
Y= Tidpunkterna angivna i antal dagar från första snön anlände till dagen då snödjupet är mätt (X1, X2). Y1 utgör den första och Y2 den andra tidpunkten.

Marktemperaturmätningar 1994-2016 - Omvandling till tjälförekomst

Eftersom de direkta tjäldjupsmätningarna på Svartbergets försökspark upphörde 1998 användes därefter en ny serie marktemperaturmätningar. De nya mätningarna saknar direkt mätning av tjäle, varför denna får förutsägas utifrån marktemperaturen. De påbörjades 1994 och görs fortfarande. Marktemperatur var mätt på tre olika djup; 5cm, 10cm samt 20cm. Mätpunkten var samma *hygge på moränsnittning 225 m.ö.h.* För att definiera tidpunkten för vinterns första tjäle användes mätningar från 5cm respektive 10cm djup. Tjälad mark uppskattades uppkomma efter sju dygn med en medeltemperatur på minst -0,2°C för 5cm djup respektive -0,1°C för 10cm djup. Det fjärde dygnet av de sju sades vara tidpunkt för tjälstart vid respektive djup. Inget krav på ihållighet av den första tjälen sattes. Tjäldjupsmätningarna från *Degemark C. (red) (1984 - 2000)* för åren 1993-1998 gav riktlinjer och användes som stöd vid dessa uppskattningar. Marktemperaturen mättes med en elektrisk motståndstermometer. Felmarginalen för marktemperaturmätningarna uppskattades till +/-0,3°C (*Odin 1992*).

¹ En serie separata årsrapporter

Snödjup och marktemperatur 1994-2016

Mätdata för marktemperatur och snödjup från samma hygge åren 1994-2016 studerades. Snöns isolerande effekt på marken är enligt *Decker et al. (2003)* stark vid minst 30 cm, vilket användes som gränsvärde. Tidpunkt för första tjäle bestämdes enligt beskrivna gränsvärden. Sedan korrelerades antal dagar från 1:a oktober fram till tjälstart med antal dagar där snödjupet överskred 30cm (fram till tjälstart). Detta gjordes för samtliga år på båda mätdjupen. År där uppskattad tjälning uteblev räknades inte med. På 5cm djup saknades åren 2008-2014 mätningar varefter åren 1994-2007 och 2014-2016 användes. På 10cm djup kunde mätningar mellan 1994-2015 användas. Medeltjäldatum för åren 1994-2015 utifrån marktemperaturmätningarna togs fram.

Lufttemperatures roll för tjälstart 1985-1998 och åren 1994-2015

För varje år beräknades frostdygnsmedeltemperaturen (FSUM) ut från 1:a oktober fram till tjälstart. Dessa plottades mot antal dagar från 1:a oktober fram till tjälstart för respektive år. Även för åren 1994-2015 plottades FSUM mot dagar till tjälstart.

Snödagar 1981-2015

Ett medeltal för antal snödagar för åren 1981-2015 beräknades. Alla dagar med ett snötäcke över 0cm räknades med.

Statistiska test

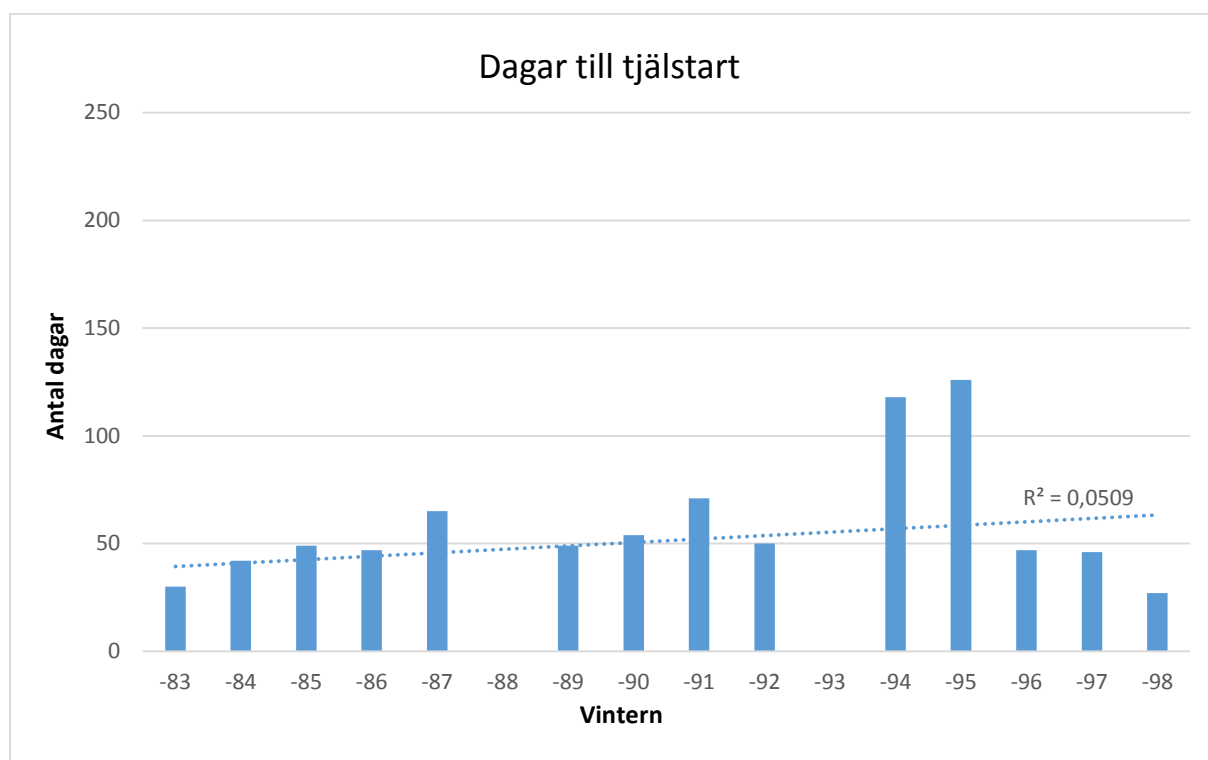
Visuella och statistiska analyser gjordes i Norsys Technologys *Minitab 17*. För att se om data från 1994-2016 för antal snödagar över 30cm innan tjälstart var approximativt normalfördelat gjordes både visuella och statistiska analyser. En regressionsanalys gjordes för punkterna antal snödagar över 30cm innan tjälstart och dagar fram till tjälstart. Detta gjordes för data från både 5 och 10cm djup. Dagar till tjälstart och FSUM för båda djupen testades visuellt och statistiskt för att se om datat var normalfördelat. För 5cm djup testades även tiologaritmen av datat. Regressionsanalyser för punkterna dagar till tjälstart och FSUM för båda djupen gjordes.

Datat antal dagar till tjäle, SPCM och FSUM för åren 1983-1998 transformerades med LOG10. FSUM multiplicerades även -1 för göra värdena positiva. Dessa punkter analyserades visuellt och statistiskt för att se om de var approximativt normalfördelade. Regressionsanalyser över $^{10}\log(\text{SPCM})$ och $^{10}\log(\text{antal dagar till tjälstart})$, $^{10}\log(\text{SPCM})$ och $^{10}\log(\text{FSUM})$, samt $^{10}\log(\text{antal dagar till tjälstart})$ och $^{10}\log(\text{FSUM})$ gjordes.

RESULTAT

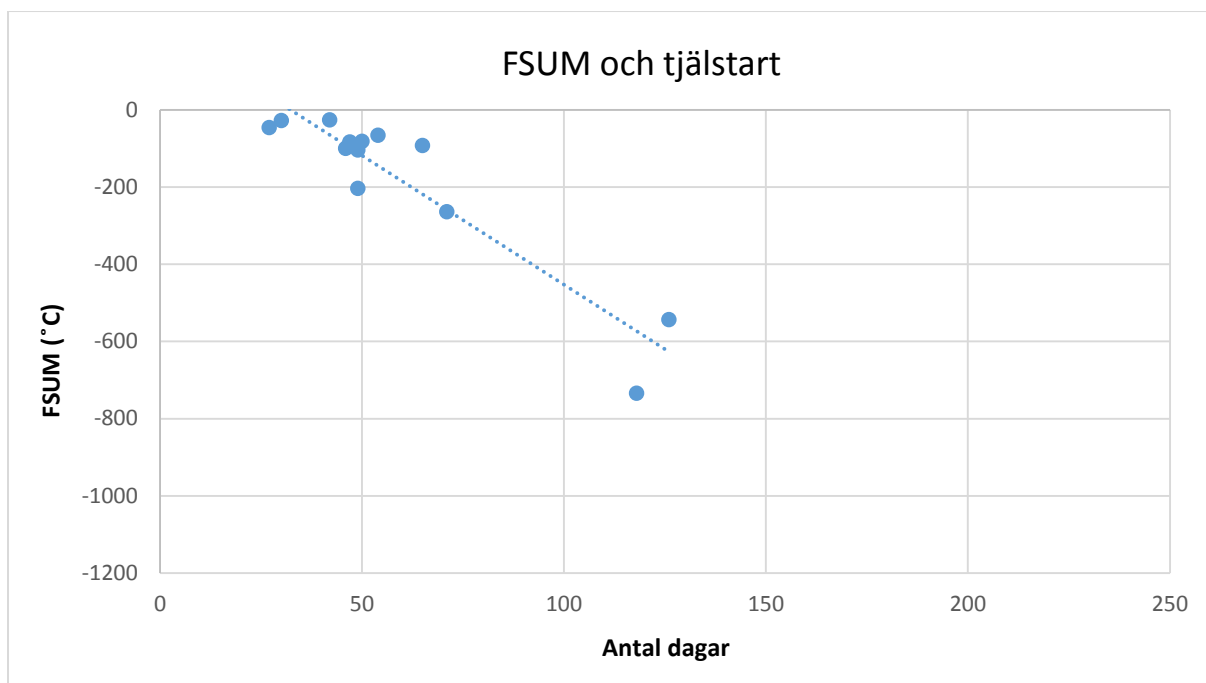
För årsserierna 1983-1998 (tjåldjupsmätningar) och 1994-2016 (marktemperaturmätningar) varierade tidpunkten för vinterns första tjåle. För åren 1983-1998 skedde tjåling som tidigast 27:e oktober och som senast den 3:e februari (*Figur 1*). Medeltjåldatum intråffade 28:e november.

Tjåldjupsmätningar 1983-1998



Figur 1. Diagram över dagar från 1:a oktober till tjålstart för tjåldjupsmätningar åren 1983-1998 i Svartberget
Figure 1. Diagram over days from 1st of October to initiation of ground frost using ground frost measurements during 1983-1998 in Svartberget.

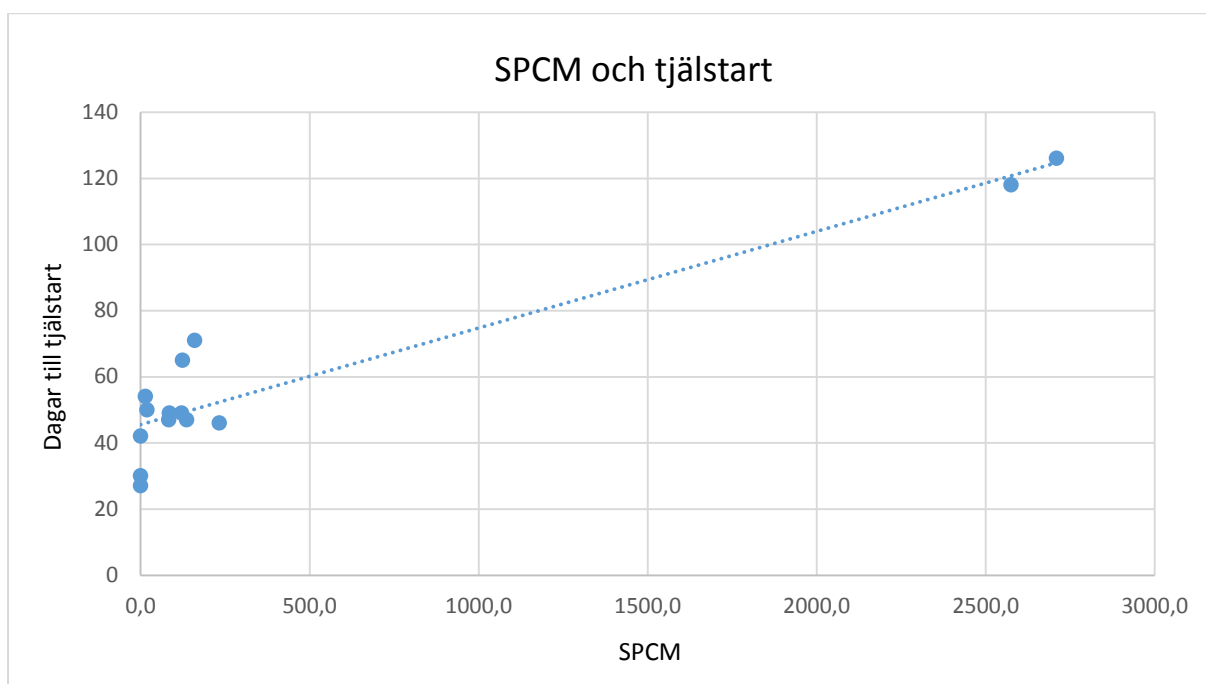
Mellan vintrarna 1983-1998 uppvisas en variation i hur stor frosttemperatursumma (FSUM) som behövs för att den första tjålen ska bildas (*Figur 2*). Statistiska och visuella test tydde på att de transformerade data (*FSUM*, *SPCM* och *dagar till tjålstart*) var approximativt normalfördelade. En regressionsanalys av $^{10}\log(\text{antal dagar till tjålstart})$ och $^{10}\log(\text{FSUM})$ gav $R^2 = 78,2\%$ och $P < 0.000$.



Figur 2. Diagram över FSUM och dagar från 1:a oktober till tjälstart för tjäldjupsmätningar åren 1983-1998 in Svartberget

Figure 2. Diagram over FSUM and days from 1st of October to initiation of ground frost using ground frost measurements during 1983-1998 in Svartberget

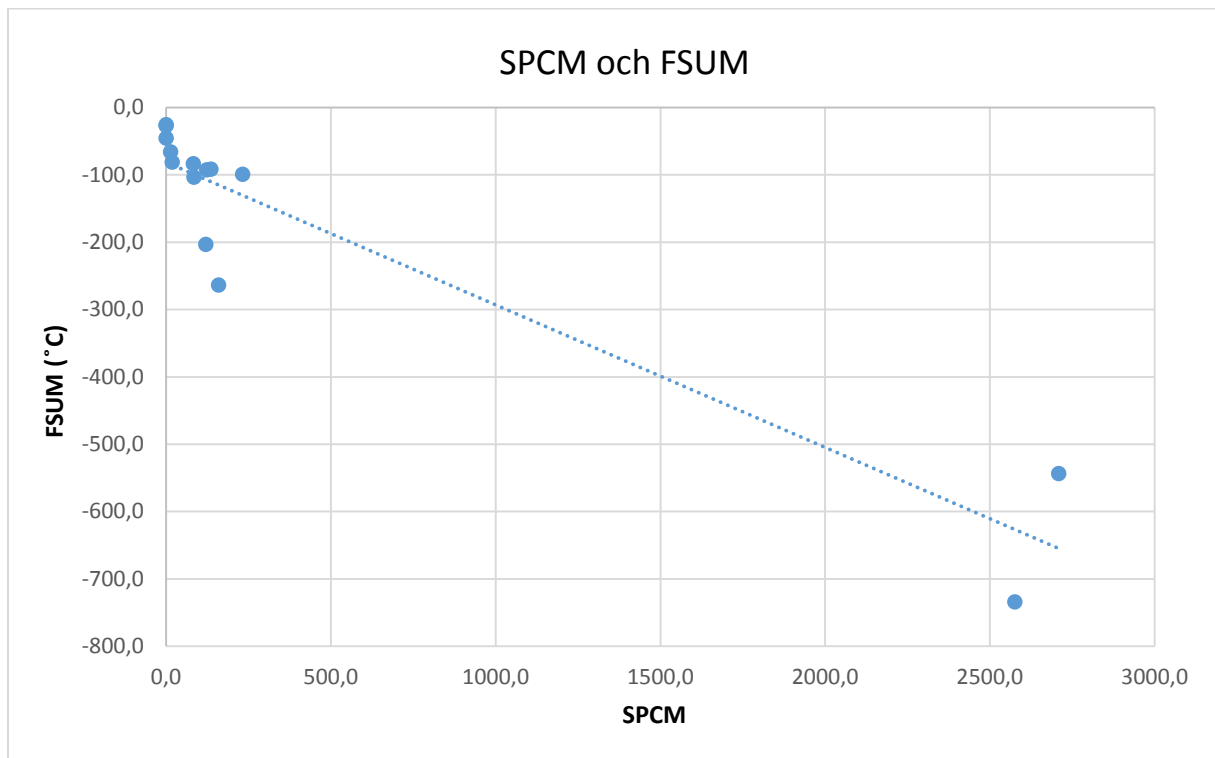
Med högre snöperiodscentimeter (SPCM) krävs fler dagar till tjälstart för åren 1983-1998 (Figur 3). En regressionsanalys av $^{10}\log(\text{SPCM})$ och $^{10}\log(\text{dagar till tjälstart})$ gav $R^2 = 73,7\%$ och $P < 0.000$.



Figur 3. Diagram över SPCM och dagar till tjälstart åren 1983-1998 i Svartberget

Figure 3. Diagram over SPCM and days to ground frost start during 1983-1998 in Svartberget.

Med högre SPCM krävs en större FSUM för att den första tjälen ska bildas åren 1983-1998 (Figur 4). En regressionsanalys av $^{10}\log(\text{SPCM})$ och $^{10}\log(\text{FSUM})$ gav $R^2 = 83,8\%$ och $P < 0.000$.



Marktemperaturmätningar 1994-2016

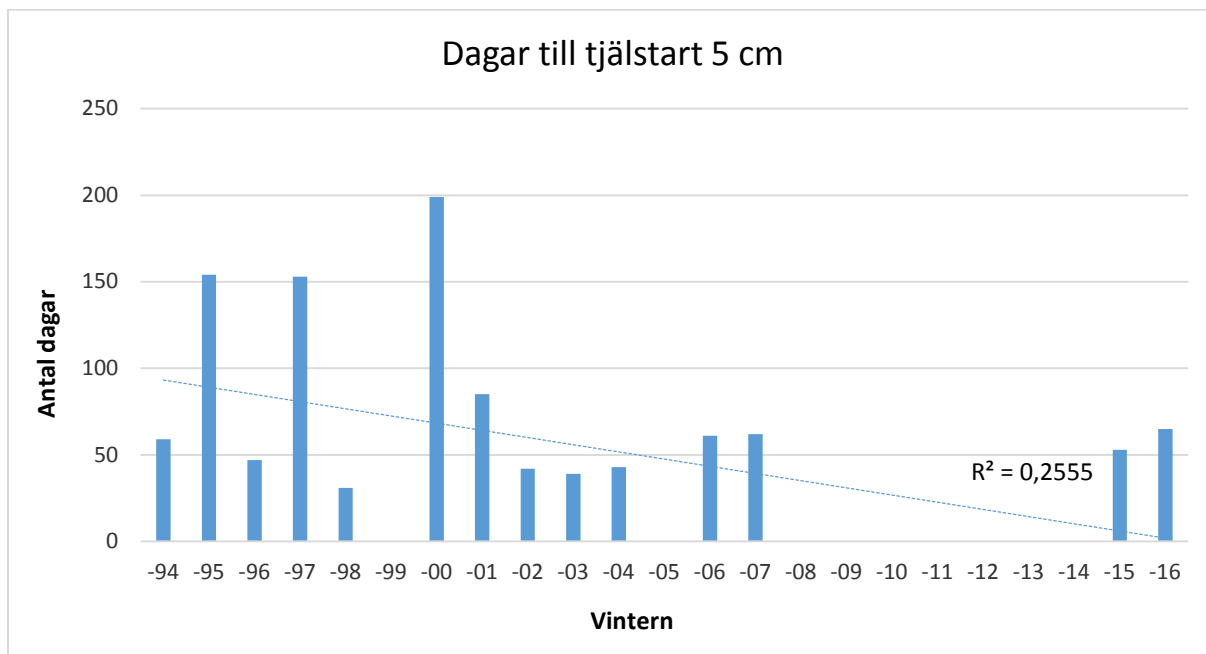
Generellt inträffade tjälstart på 10cm djup inte mer än några veckor senare än på 5cm djup med några undantag (*Tabell 1*). För åren 1999 och 2005 uppkom ingen tjäle på 5cm djup. På samma mätdjup saknas mätdata mellan vinter 2008 till vinter 2014. För åren 1999, 2000, 2002, 2008, 2012 uppkom ingen tjäle på 10cm. På det här mätdjupet fanns bristfälligt data för vintern 2013. Mätningar på 10cm djup har en större kontinuitet mellan åren (fler mätpunkter) och ger tydligare mönster än de på 5cm djup.

Tabell 1. Tabell över antal dagar från 1:a oktober till tjälstart för djupen 5cm och 10cm under åren 1994-2016 i Svartberget. Teckenförklaring: ”-” = tjäle uteblev, ”x” = inget mätdata

Table 1. Table over days from 1st of October to initiation of ground frost at the depths 5cm and 10cm during 1994-2016 in Svartberget. Legend: “-” = no ground frost, “x” = no data.

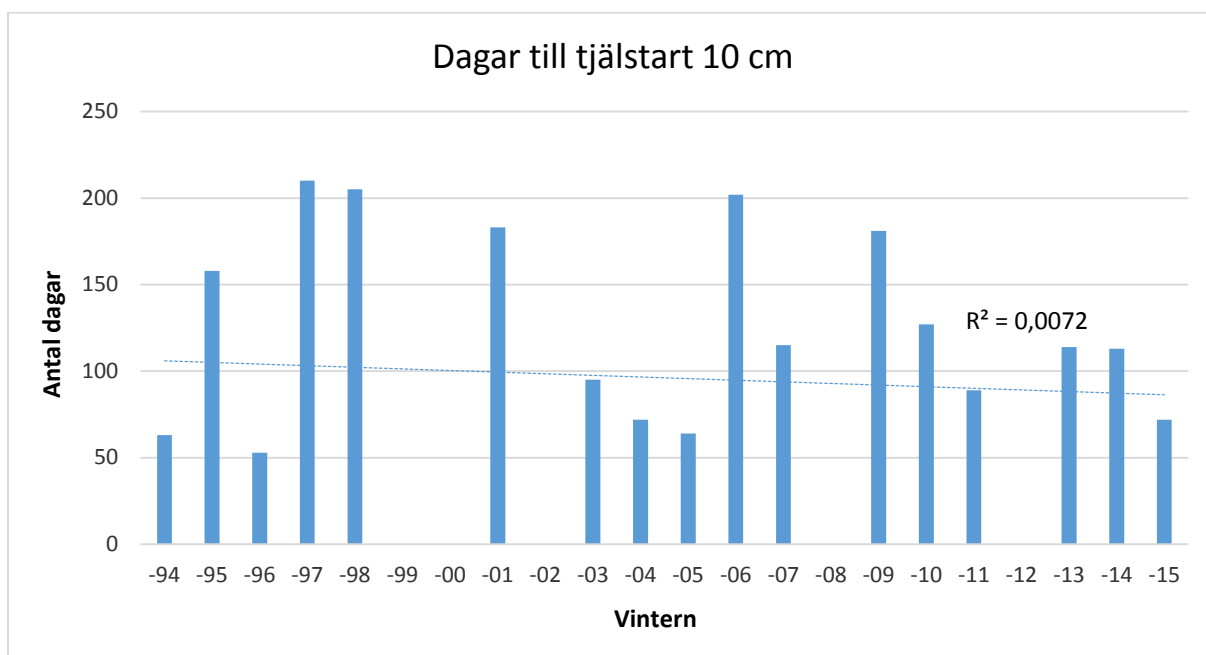
År	Antal dagar till tjälstart	
	5cm djup	10cm djup
1994	59	63
1995	154	158
1996	47	53
1997	153	210
1998	31	205
1999	-	-
2000	199	-
2001	85	183
2002	42	-
2003	39	-
2004	43	95
2005	-	72
2006	61	64
2007	62	202
2008	x	115
2009	x	181
2010	x	127
2011	x	89
2012	x	-
2013	x	x
2014	x	113
2015	53	72
2016	65	-

För åren 1994-2016 uppskattades tjälning ske som tidigast 31:a oktober och som senast 17:e april på 5cm djup respektive 22:a november och 28:e april på 10cm djup (*Figur 5.1 och 5.2*). Medeltjäldatum beräknades till 17:e december och 31:a januari för de respektive djupen.



Figur 5.1. Diagram över dagar till tjälstart för marktemperaturmätningar på 5cm djup åren 1994-2016 i Svartberget.

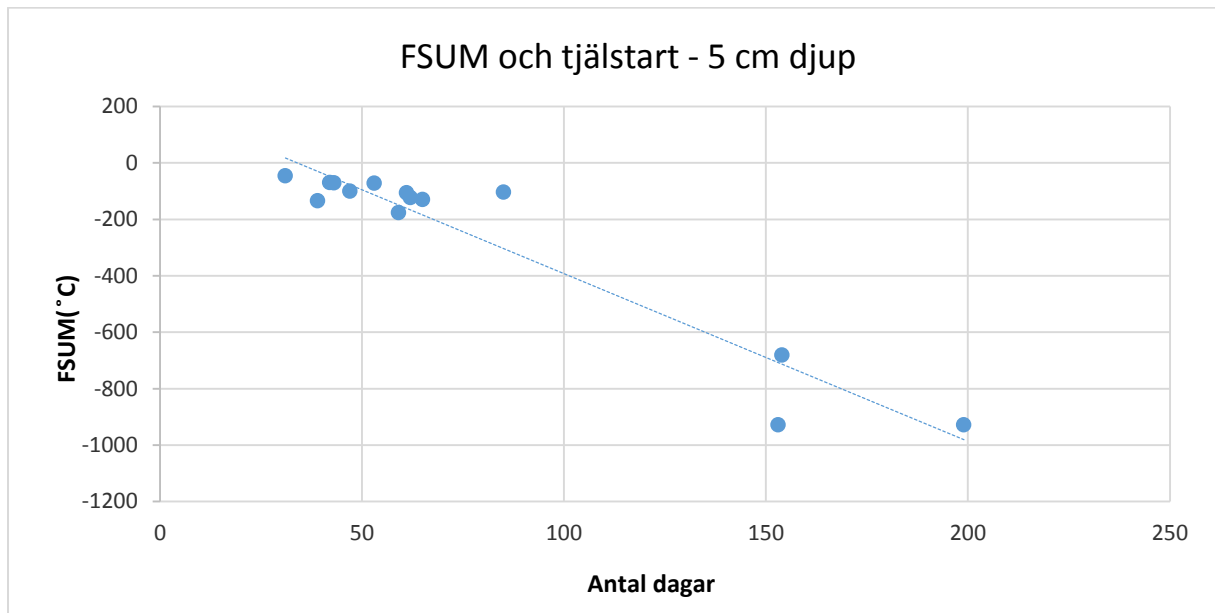
Figure 5.1. Diagram over days to ground frost start using ground temperature measurement at 5cm depth during 1994-2016 in Svartberget



Figur 5.2. Diagram över dagar till tjälstart för marktemperaturmätningar på 10cm djup åren 1994-2015 i Svartberget.

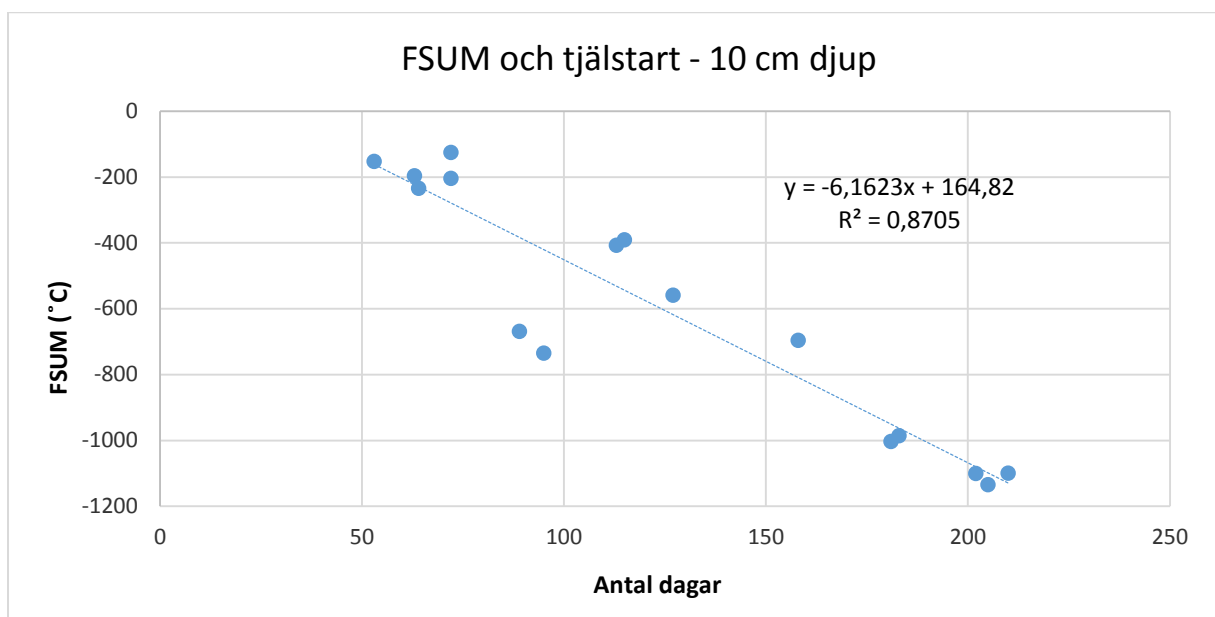
Figure 5.2. Diagram over days to ground frost start using ground temperature measurements at 10cm depth during 1994-2015 in Svartberget.

När tjälstart inträffar senare krävs en större FSUM för åren 1994-2016. Mellan åren finns en spridning i hur stor FSUM som behövs för att den första tjälen ska bildas (*Figur 6.1 och 6.2*). Data på 5cm djup logaritmerades med 10. Vi ansåg att dessa var approximativt normalfördelade. En regressionsanalys gav $R^2 = 81,8\%$ och $P < 0,000$. På 10cm djup ansåg vi att de ursprungliga data var approximativt normalfördelade. Regressionsanalys gav $R^2 = 87\%$, $P < 0,000$ (*figur 6.2*).



Figur 6.1. Diagram över FSUM och dagar till tjälstart för marktemperaturmätningar på 5cm djup åren 1994-2016 i Svartberget

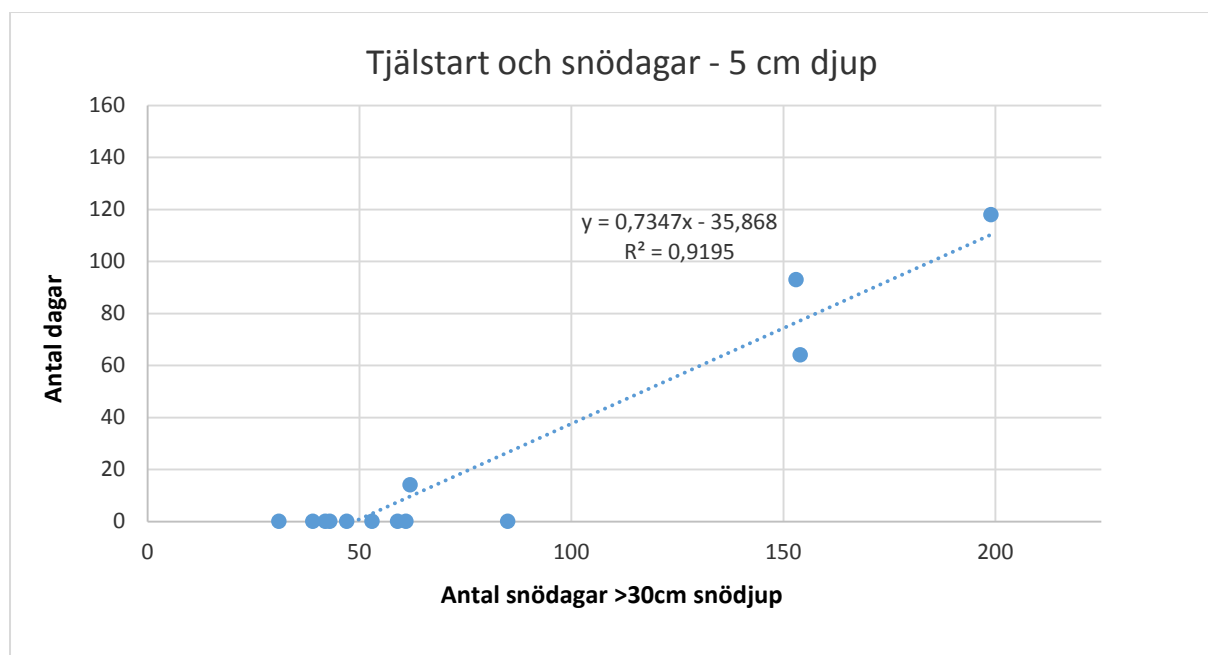
Figure 6.1. Diagram over FSUM and days to ground frost using ground temperature measurements at 5cm depth during 1994-2016 in Svartberget



Figur 6.2. Diagram över FSUM och dagar till tjälstart för marktemperaturmätningar på 10cm djup åren 1994-2015 in Svartberget

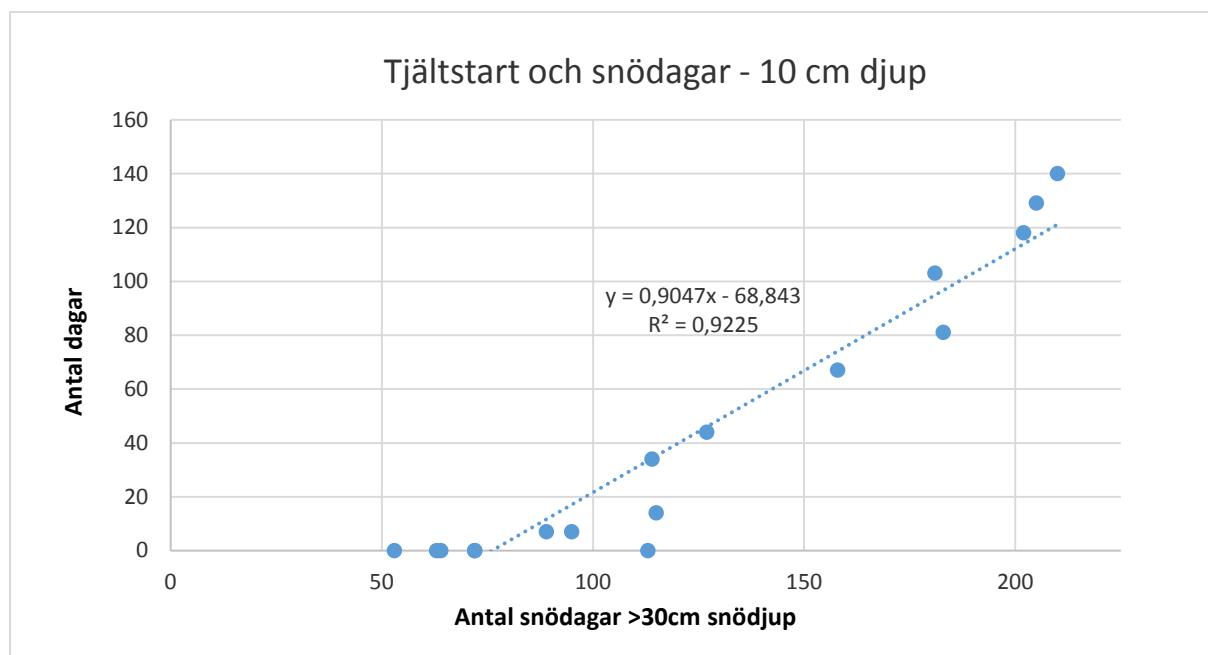
Figure 6.2. Diagram over FSUM and days to ground frost using ground temperature measurements at 10cm depth during 1994-2015 in Svartberget

Med ökande antal snö dagar med snödjup över 30cm blir tjälstarten fördröjd för åren 1994-2016 (*Figur 7.1 och 7.2*). Visuella och statistiska test (*Ryan-Joiner normality test*) tydde på att data från 5 och 10cm djup var normalfördelat. En regressionsanalys gav $R^2 = 0,92$ och $P < 0,000$ för båda djupen.



Figur 7.1. Diagram över snö dagar med minst 30cm snödjup och dagar fram till tjälstart på 5cm djup åren 1994-2016 i Svartberget.

Figure 7.1. Diagram over snow days with a snow depth of 30cm or more and days to ground frost start at a depth of 5cm during 1994-2016 in Svartberget.



Figur 7.2. Diagram över snö dagar med minst 30cm snödjup och dagar fram till tjälstart på 10cm djup åren 1994-2016 i Svartberget.

Figure 7.2. Diagram over snow days with a snow depth of 30cm or more and days to ground frost start at a depth of 10cm during 1994-2016 in Svartberget.

DISKUSSION

Snötäckets påverkan

Figurerna 2, 6.1 och 6.2 tyder på att det finns fler faktorer än lufttemperatur som avgör tjälstart. Att snön har en påverkan för tjälförekomst indikeras av resultaten i denna studie. De stödjer vår hypotes (1). Från analyser av mätdata åren 1983-1998 observerades flera intressanta mönster - både FSUM och tjälstartsdatum korrelerar med antal snöperiodcentimeter (SPCM) (figur 3 och 4). Sambanden underbyggs till stor del av mätdata från endast två separata år då tjälstarten kom sent och bör tolkas med viss försiktighet. Data tycktes vara approximativt normalfördelade först när de transformerades med $^{10}\log$. Regressionsanalyser gav starka korrelationskoefficienter och visade att resultaten var statistiskt signifikanta.

För årsserien 1994-2016 finns det anledning att tolka graferna figur 7.1 och 7.2 med viss skepticism. Den uppskattade felmarginalen för marktermometern som användes sades ligga på $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$. Vår omvandling från marktemperatur till tjälförekomst baseras på gränsvärdena $-0,2^{\circ}\text{C}$ och $-0,1^{\circ}\text{C}$ för 5cm respektive 10cm djup. En osäkerhet i tjälstartsberäkningarna bör av dessa anledningar räknas med. Vidare borde osäkerheten för 10cm djup vara högre än den för 5cm djup. Vi ansåg att data var approximativt normalfördelade. Regressionsanalyserna gav för båda djupen starka korrelationskoefficienter. Analyser av de två oberoende årsserierna stödjer båda hypotes (2) som säger att snöns varaktighet och djup starkt påverkar när vinterns första tjäle uppkommer.

I den här studien har snödensiteten inte vägts in i uppskattningar av snötäckets isolerande förmåga. Mitt i vintern, under januari och februari, är den stora procentmassan snö torr och lös medan den i slutet av vintern ofta är lös och blöt eller "skarig" (fast och hård). Även i början av vintern förekommer en del lös och blöt snö. Variationer i snödensitet finns alltid närvarande när man ser till hela vintern (Ager 1961).

Det är många samspelande faktorer som påverkar tjälförekomst vilket gör den svårstuderad och bedömd. Marktjälning påverkas av fler parametrar som styr dess storlek och djup än de vi har kunnat studera med vårt datamaterial. Framförallt vattenmättnadsgraden i marken har en stor påverkan. Eftersom vatten har en mycket högre energilagring förmåga än luft kan det hålla marktemperaturen uppe. Det krävs mycket högre energi för vatten att frysa. Torra och väl-dränerade jordar är därav de jordar som fryser lättast och snabbast. Motsatt gäller för blöta jordar (Magnusson 2009). Eftersom vattenhalten i marken inte är ett fixt värde utan något som varierar kontinuerligt är detta så klart en felkälla som bidrar till spridningen för korrelationerna i figur 3, 4, 7 och 8 som alla mest troligt skulle visa tydligare mönster om denna parameter vägts in.

Tjälstart 1983-2016 och i framtiden

För de två årsserierna hittades inget tydligt mönster över hur tjälstartsdatum har förändrats över tiden. För åren 1983-1994 kunde en mycket svag indikation mot senare tjälstart visas. En rimlig förklaring till detta kan vara de flera mycket kalla vintrarna vid Svartberget på 1980-talet. För åren 1994-2016 hittades en lika svag trend fast mot tidigare tjälstart. Vi kan således inte säga någonting om hur tidpunkten för tjälstart har eller kan komma att förändras i framtiden genom att bara titta på den faktiska tidpunkten för tjälstart.

När vi jämför medelvärdet av antal snö dagar för vintrarna 1981 till 2015 från Svartberget med studier av *Ager (1964)* för 1932-1959 vid Kulbäcksliden i Vindeln finner vi tidstrender. För vintrarna 1932-1959 uppgår medelvärdet av antal snö dagar till 161 dagar medan vårt medelvärde för 1981-2015 uppgår till 173 dagar - alltså en ökning med 12 dagar. Om vi antar att de 12 dagarna utgörs av både höst- och vårdagar borde således tjälstarten idag ankomma senare vid Svartberget och Kulbäcksliden jämfört med för 57-84 år sedan. Detta förutsatt att de extra snö dagarna har ett tillräckligt mäktigt snötäcke för ge en betydande isolerande effekt. Sett till hela Södra Norrland skedde en minskning av antal snö dagar med mellan 10-30 dagar under 30 års-perioden 1960/61 - 1989/90 (*Wern 2015*). För norra Sverige förutsägs snötäckets varaktighet minska med 73-93 dagar inom ett sekel till följd av klimatförändringarna (*Mellander et al. 2007*). Detta borde i framtiden kunna ge förutsättningar för en tidigare tjälstart och mer utbredd marktjälning.

Klimatförändringar och tjälförekomst

I den finska studien av *Venäläinen, et al. (2001)* har man studerat konsekvenser för tjälförekomst till följd av klimatförändringar. Man fick där ett varierande resultat över mellersta, norra och södra Finland. Tjälperioden minskar generellt i norra och mellersta Finland då temperaturökningen ännu inte är stark. Nederbörden kommer därav ännu inte som regn, istället förväntas mer snöfall. Snösmältning på vintern kan bli mer förekommande i södra Finland och därav öka chansen till tjäle där då ett konstant snötäcke uteblir.

Temperaturökningen kommer också troligen leda till att ett mindre mäktigt snötäcke blir vanligare över tid vilket tillåter en djupare frysning av tjälen.

Moore & McKendry (1996) föreslår att det kommer uppstå lokala variationer i hur snöförekomsten förändras i och med klimatförändringar. Vissa mönster borde ändå förväntas uppträda i hur områdets tjäl- och snöförekomst förändras över tiden. I det korta loppet borde perioder med marktjäle öka och tjälstarten anlända tidigare i och med minskad snöförekomst. När klimatet blir tillräckligt varmt kan tjälperioder istället förkortas då lufttemperaturer oftare stiger över 0°C. I *Johns T.C. et al. (2003)* modelleras olika storskaliga klimatscenarier. Beroende på hur många graders ökning vi har framför oss borde vi kunna förvänta oss många olika utfall för förändring av tjälförekomst globalt.

Möjliga konsekvenser för skogsbruket och skogsmarken

Det finns många effekter av förändrade tjälförhållanden för skogsbruket. Den största delen av Sveriges skogsbilvägar har idag en tillgänglighetsstandard C eller sämre. En väg av klass C är byggd som en farbar åretruntväg utom vid perioder av hög nederbörd eller tjällossning.

Tjällossningsfrekvensen ökar med temperaturförändringen och prediktioner lutar åt en större nederbördsmängd vintertid. Detta är en viktig aspekt för framför allt sydvästra Götaland och södra Norrland där risken för körskador på grund av nederbörd och tjällossningsförekomst är som störst. Om vägar inte håller tillräckligt hög klass och nyttjas under svårare förhållanden kan det leda till kollapser. Följder kan bli ökad avrinning och urlakning vilket kan förstöra vattenmiljön i området och i värsta fall dricksvatten (*Bergh et al. 2007*).

Vintertrakter är en viktig del inom planeringen för skogsägare och företag. Med vintertrakt menas en trakt som behöver avverkas vintertid när marken är tjälad. Om tjälen uteblir eller att perioden för tjälen minskar så blir det svårare rent planeringsmässigt att ta till vara på dessa trakter. Enligt *Bergh et al. (2007)* förväntas klimatförändringarna ge kortare och mera sporadiska tjälförekomster i framtiden. Vissa trakter blir mycket dyrare att avverka om de inte kan tas på vintern på grund av t.ex. ökat skotningsavstånd medan andra trakter blir mer eller mindre ekonomiskt ohållbara att avverka om inte marken är tjälad. Vid andra trakter kommer inte vägarna att kunna användas som nämnts tidigare på grund av den bristande vägkvaliteten under tjällossning - ett problem som i framtiden kommer kräva nya lösningar för att även kunna utnyttja dessa trakter. Initialt kommer denna klimatförändring medföra att en större andel drivning kommer att utföras på fuktiga marker med låg bärighet och en ökning av markskador som följd (*Bergh et al. 2007*).

Det växande problemet med vinteravverkningar förväntades 2007 ge en framtida ekonomisk merkostnad vilken beräknas till 5-10kr/ m³fub för avverkningsarbete. (*Sonesson 2007*). Detta jämfört med den totala kostnaden för drivning per m³fub som 2007 i snitt låg på 85kr/ m³fub enligt (*Christiansen (red) 2014*). Det medförde en merkostnad för skogsägaren på 6-12%.

För körskador i form av kompaktering har djupgående tjälbildning en viktig återställningsmekanism. Tjälen hjälper till att återskapa aggregering och på så sätt återfås en bra syreomsättning i marken (*Magnusson 2009*). Körskador i form av djupa hjulspår uppstår lätt på blöta vintertrakter när tjälen inte lagt sig eller är för grund. Hjulspåren som uppkommer medför mekaniska skador på trädens rötter. På fuktiga marker är detta extra känsligt då en stor del av trädens rötter ligger uppe vid markytan. Avbrutna och skadade rötter medför konsekvenser som minskad stabilitet hos träden samt höjer risken för angrepp av rotpatogener (*Magnusson 2009*).

Erosion är en ytterligare konsekvens av körskador, djupa spår blir som en ofrivillig dikning i marken. Med en minskad infiltration från kompaktering samt en större avrinning på grund av kalhuggning får vi en stor transport av partiklar och jordmaterial ut i vattendragen (*Magnusson 2009*). Kvicksilver i marken binder starkt till det organiska materialet vilket gör att det ackumuleras. I och med att det är hårt bundet till humuspartiklar kan det lätt urlakas genom avrinning och erosion. Metylkvicksilver skapas i syrefattiga miljöer, e.g. i blöta

skogsmarker. Detta kvicksilver är mer giftigt och tas lättare upp av olika organismer genom att ämnet ackumuleras och kan lätt uppnå skadliga halter, e.g. i fisk. (Skjellberg 2003)

Med mindre utbredd tjälförekomst och blötare jordar vintertid förväntas skogsbestånds vindkänslighet öka. Denna effekt är oberoende av en eventuell ökning av framtida stormintensiteter (Blennow & Olofsson, 2004). Tjälén fungerar som ett bindningsmedel i marken och gör att denna håller samman bättre och därmed minskar risken för vindfällning. Ökad vattenhalt i en frusen jord har däremot en motsatt effekt vattnet löser upp jorden och gör den instabil. Mer aktiv skötsel och alternativa trädslagsval (andra än den vindkänsliga granen) kan, i och med detta scenario, behövas för att motverka stormskador i framtiden. Vidare håller glesare bestånd mer snö än slutna (Mellander, et al. 2005). Dessa bör, i detta avseende, anses bli extra känsliga.

De indirekta effekter som klimatförändringar kan komma att ha på tjälförekomst har även betydelse för markkemiska processer. Träds finrötter är mer känsliga för frost och invintrar senare än träddeklar ovan jord. Detta gör dem mer utsatta för frostsador under vintrar med tidig marktjälning. En förändring av finrötters aktivitet kan ha stora effekter på upptag och tillgänglighet av näringsämnen. Detta kan spå på de näringsförluster som kan uppstå på våren då mineralisering och nitrifikation ibland överstiger växters näringsupptag (Groffman 2001). Starkare marktjälning kan också leda till en kortare växtsäsong och en utsläppsminskning av den starka växthusgasen CH₄ på boreala torvmarker. Dessa står uppskattningsvis för en fjärdedel av metanutsläppen från världens våtmarker (Zhao et al. 2016). Vidare innebär ökade marktemperaturer vintertid en högre heterotrofisk aktivitet i skogsekosystem. Detta medför bland annat högre CO₂ utsläpp (Eliasson et al. 2005). Mellander et al (2007) förutspådde att marktemperaturer i Norra Sverige kommer att öka med mellan 0,9-1,5°C på 10cm djup. Samtidigt kan en minskning av snötäckets längd och djup innebära att markrespirationen i framtiden minskar och kolbalansen skiftar åt motsatt håll (Monson et al. 2006).

Slutsatser

När snöns djup och initiala varaktighet jämförs mot vinterns första tjäle vid Svartberget hittades tydliga samband. Förutom lufttemperatur visas att snöförekomst utgör en starkt påverkande faktor för marktemperatur och tjälning. Under år med mycket och tidig snö inträffade tjälstart senare. Att snön, genom sin isolerande förmåga, påverkar tjälstart visas av resultaten från de två separata årsserierna. Ingen tydlig tidstrend mot tidigare eller senare tjälstart inom de studerade årsserierna hittades. För att få ännu tydligare resultat bör vidare tjälstudier även inkludera markens vattenmättnadsgrad och snöns densitet.

REFERENSER

Ager B. H. (1964). *Studier över Klimatet i Norrland, Dalarna och Värmland*. Stockholm: SLU, Skogshögskolan

Bergh J., Blennow K., Andersson M., Olofsson E., Nilsson U, Sallnäs O. och Karlsson M. (2007). Effekter av ett förändrat klimat på skogen och implikationer för skogsbruket. Appendix B19 i “Sverige inför klimatförändringar – hot och möjligheter”. Klimat och sårbarhetsutredningen SOU 2007:60

Blennow K, Olofsson E. (2004). Kan man undvika stormskador? SUFOR s. 347-360 URN: urn:nbn:se:lnu:diva-25451OAI: oai:DiVA.org:lnu-25451DiVA: diva2:618143

Christiansen L., S. K. (2014). Skogsstatistiska årsboken 2014. Jönköping: Skogsstyrelsen. Magnusson, T. (2009). Skogsbruk, mark och vatten. i C. Fries (red), *Skogsskötselserien 13*. Jönköping: Skogsstyrelsen. Hämtat mars 2015

Decker K. L. M., Wang D., Waite C., and Scherbatskoy T. (2003). Snow Removal and Ambient Air Temperature Effectson Forest Soil Temperatures in Northern Vermont. Soil Science society, 67: 1234-1242.

Degemark, C (red). (1984-2000). *Klimat och Vattenkemi vid Svartberget*. Vindelns försöksparker SLU.

Drotz S , Sparrman T, Nilsson M.B, Schleucher J, Öquist M.G. (2010). Both Catabolic and anabolic heterotrophic microbial activity proceed in frozen soils. *Proceedings of the National Academy of Science of the United states of America*, 107(49), 21046-51.

Eliasson P. E, Mcmurtrie E.R, Pepper A. D, Strömngren M, Linder S, Ågren G. I (2005). The response of heterotrophic CO₂ flux to soil warming. *Global Change Biology*, 11: 167-181.

Eriksson H. (2007). *Svenskt Skogsbruk möter klimatförändringar*. Jönköping: Skogsstyrelsens förlag.

Groffman C. T. (2001). Colder soils in a warmer world: A snow manipulation study in a northern hardwood forest ecosystem. *Biogeochemistry*, 56: 135-150.

Haei M, Rousk J., Ilstedt U, Öquist M, Bååth E., Laudon H.. (2011). Effects of soil frost on growth, composition and respiration of the soil microbial decomposer community. *Boilogy and biochemistry*. 43. 2069–2077.

Hillel D. (1980). *Fundamentals of soil physics*. New York: Academic press.

Johns T.C, Gregory J.M, Ingram W.J, Johnson C.E, Jones A., Lowe J.A, Mitchell J.F.B., Roberts D.L, Sexton D.M.H., Stevenson D.S, Tett S.F.B, Woodage M.J (2003). Anthropogenic climate change for 1860 to 2100 simulated with the HadCM3 model under updated emissions scenarios. *Climate Dynamics*, 20: 583-612.

Laudon H., Ottosson Löfvenius M. (2016) (accepterad). Adding snow to the picture-providing complementary winter precipitation data to the Krycklan catchment study

database. Hydrological Processes DOI: 10.1002/hyp.10753.

Laudon H, Taberman I, Ågren A, Futter M, Ottosson-Löfvenius M, Bishop K. (2013) The Krycklan Catchment Study— A flagship infrastructure for hydrology, biogeochemistry, and climate research in the boreal landscape. *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 49, 1–5, doi:10.1002/wrcr.20520, 2013.

Mellander P. E, Laudon H, Bishop K. (2005) Modelling variability of snow depths and soil temperatures in Scots pine stands. *Agricultural and Forest Meteorology* Vol. 133, issue 1-4 Pages 109–118 doi:10.1016/j.agrformet.2005.08.008.

Mellander P, Ottosson Löfvenius M, Laudon H. (2007). Climate change impact on snow and soil temperature in boreal Scots pine stands. *Climate change*, 85: 179-193.

Minitab 17, (den 10 06 2016). Hämtat från www.norsys.se:
<http://norsys.se/norsyspage/products/data-analysis/minitab/>.

Moore R. D, McKendry I. G (1996). Spring Snowpack Anomaly Patterns and Winter Climatic Variability, British Columbia, Canada. *Water Resources Research* Pages 623–632 volume 32 DOI: 10.1029/95WR03640

Odin H. (1992). *Climate and conditions in forest soils during winter and spring at Svarberget Experimental Forest Station part 1: Climate*. Uppsala: SLU.

Russell K, Monson D. L. (2006). Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition. *Nature*, 439: 711-714.

Skyllberg U. (2003). Kvicksilver och metylkvicksilver i mark och vatten. Fakta skog.11. SLU, Fakulteten för skogsvetenskap, Umeå

SMHI. (den 14 03 2016). www.smhi.se/kunskapsbanken. Hämtat från www.smhi.se:
www.smhi.se/kunskapsbanken/tjale-1.20264

Sonesson J. I. B. (2007). Klimatförändringarnas inverkan på drivning och logistik i skogsbruket. Uppsala: Skogforsk.

Venäläinen A, H. T. (2001). Impact of climate change on soil frost under snow cover in a forested landscape. *Climate Research*, 17: 63-72.

Wern L. (2015). *Snödjup i Sverige 1904/05 - 2013/14*. Norrköping: SMHI.

Zhang T. (2005). Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: an overview. *Rev. of Geophysics* 43:1-23

Zhao J., M. P. (2016). Enhanced winter soil frost reduces methane emission during the subsequent growing season in a boreal peatland. *Global Change Biology*, 22: 750-762.

